основе теоретических исследований и лабораторных экспериментов модель спроектирована как амфибийное плавсредство грузоподъемностью 500 кг (ТСВГ-0,5), при полной массе 1,25 т. Самоходные испытания модели подтвердили уникальную универсальность ходовых качеств и показали удовлетворительное согласование с проектными расчетами. Краткий фильм об испытаниях мореходной модели подтверждает универсальность ходовых качеств ТСВГ.

Воздухоопорная гусеница сочетает в себе преимущества воздушной подушки и гусеницы. Внутригусеничный понтон опирается на равномерно распределенное избыточное давление воздуха. Такая подвеска обеспечивает хорошую плавность хода, избавляя корпус от концентрированного воздействия неровностей грунта и волновых ударов. При этом полный вес транспортного средства передается на грунт через опорные поверхности гусениц, чем обеспечиваются высокие сцепные качества при наличии воздушной подушки.

Схема воздухоопорной гусеницы показана на рис. 2. Гусеничный обвод образован широкой эластичной лентой – 1, которая заведена с некоторым избытком длины вокруг барабанов – 2. На внешней поверхности гусеничной ленты крепятся большие надувные грунтозацепы, названные пневмоплицами – 3. Внутригусеничный понтон – 5 (рис. 2, б) делит внутренний объем ВГ на две полости: верхнюю и нижнюю полость – 6. Воздушная подушка занимает объем нижней полости – 6. Гусеничная лента – 1 выполняет функции гибкого ограждения ВП в носовой и кормовой оконечностях и охватывает ВП снизу.

Бортовые ограждения ВП выполнены в виде жестких скегов, имеющих плоские вертикальные стенки, которые обращены к бортовым кромкам гусеничной ленты – 1. Нижняя часть скега конструктивно оформлена в виде полоза. Для снижения утечек из ВП зазоры уплотнены, например, зазор между понтоном – 5 и барабаном – 2 имеет уплотнение – 8.

Подача воздуха от нагнетателя в нижнюю полость – 6 приводит к выпучиванию нижней ветви ВГ. Воздушная подушка выполняет роль следящего натяжного устройства для гусеницы. Гусеничная лента прижимается к барабанам под действием натяжения в ней, чем обеспечиваются самогерметизация ВП по узлу барабан-лента и возможность фрикционной передачи тягового усилия от гладкого барабана на гладкую внутреннюю поверхность ленты, как это принято на ленточных транспортерах.

При плавании на воде или в жидкой болотной грязи выпучивание воздушной подушкой нижней части ВГ обеспечивает или увеличивает плавучесть транспортного средства. На твердом грунте пневмоплицы деформируются, будучи зажатыми между грунтом и гусеничной лентой, как это показано на рис. 2, б. Развитая контактная поверхность обеспечивает малое давление на грунт и малые касательные напряжения на поверхности грунта при обеспечении тяги, что сохраняет грунт от разрушения. Избыточное давление воздуха в ВП и внешнее воздействие на ВГ в процессе эксплуатации определяют эксплуатационные формы гусеничного обвода. Многообразие внешних воздействий определяет множество эксплуатационных форм ленты ВГ. Для оценки геометрии жестких скегов ВГ множество эксплуатационных форм продольного сечения ленты ВГ набирается из ограниченного количества расчетных вариантов нагружения ленты. Представление об этой особенности проектирования ВГ можно получить на основе рис. 2, в.

Геометрические особенности исследуемых воздухоопорных гусениц заключаются в том, что:

- полоз скега проходит ниже нижней огибающей множества эксплуатационных форм ленты, что исключает большие утечки воздуха из ВП во всех режимах эксплуатации;
- нижняя поверхность внутригусеничного понтона расположена выше верхней огибающей эксплуатационных форм ленты, что исключает удары и трение гусеничной ленты о понтон;
- заданный подъем полозьев над грунтом (клиренс) обеспечивается назначением высоты деформированных плиц как суммы клиренса и расстояния от нижней ветви гусеничного обвода до полоза при проектной посадке на твердом грунте.

В сравнении с СВП для ТСВГ при той же грузоподъемности используется значительно большее избыточное давление при существенно меньшем расходе, что определяет отличия в параметрах ВГ системы воздухоподдержания ТСВГ.

Способы уменьшения утечек воздуха из ВП в

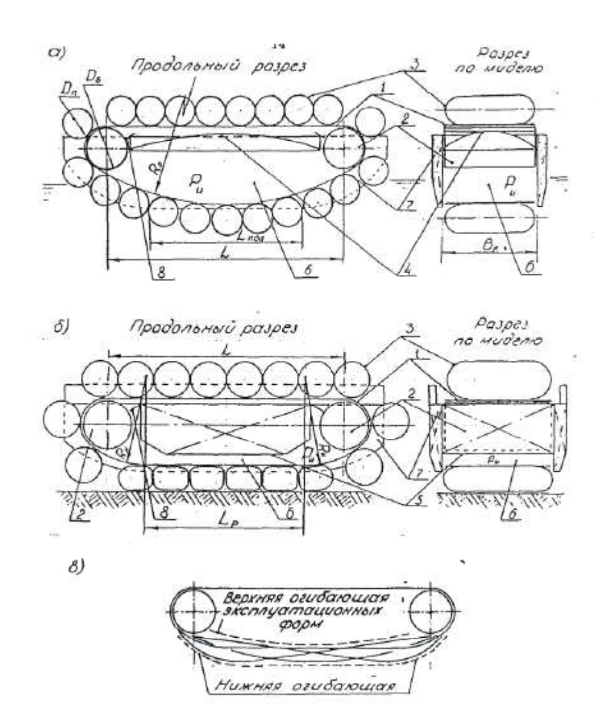


Рис. 2. Схема воздухоопорной гусеницы: а) вариант с разделительной мембраной; б) вариант с внутригусеничным понтоном; в) множество эксплуатационных форм ВГ; 1) гусеничная лента; 2) барабан; 3) пневмоплица; 4) мембрана разделительная; 5) понтон внутригусеничный; 6) нижняя полость ВГ; 7) скег; 8) уплотнение

конструкции ТСВГ существенно отличаются от применяемых в проектах СВП. Зазоры истечения воздуха у СВП определяются взаимодействием ограждения с внешней средой, это «внешняя задача» уплотнения. Зазоры истечения из ВП в конструкции ТСВГ образуются между деталями транспортного средства, внутри него, истечение является «внутренней задачей». ТСВГ должны преодолевать существенно более широкое многообразие сред бездорожья, чем СВП. Но это не повлияет столь же многообразно на характер истечения воздуха из внутренней полости ВГ.

Задачи теории проектирования, расчета ТСВГ на плаву и на грунте, удовлетворения норм при проектировании решаются с использованием элементов погруженного объема и формы контактного пятна на грунте. Расчет формы ВГ стал разрешающей проблемой многих задач.

Надежную универсальную гусеницу удается получить только при пологой ее форме в бесконтактном режиме. Это плодотворный компромисс в разрешении противоречия между требованиями задач поддержания, экологичности и задачами остойчивости, тяговой способности узла барабан-лента. Дифференциальное уравнение батокса представлено из условия равновесия элемента гусеничной ленты единичной ширины длиной dl.

$$\frac{[1+(\frac{\delta\xi}{\delta\zeta})^2]^{3/2}(\Pi + \Gamma\ \cos\alpha)}{\frac{\delta^2\xi}{\delta\zeta^2}} = T.$$

Здесь и далее P_n и P_t – нормальное и касательное давления на элемент;

$G_Э$ – вес единицы площади ВГ; Т – погонное натяжение в ленте ВГ,

α – угол наклона элемента батокса к горизонту.

За основные режимы работы ВГ приняты следующие:

1. Бесконтактный режим. Этот режим определяет необходимую высоту скега, при которой гарантируется удержание воздуха в ВГ.

2. Оболочка имеет контакт с плоским горизонтальным грунтом. В таких условиях работает оболочка при стоянке.

Аналитические решения удается упростить использованием теорем:

Теорема 1.

Для дуги окружности, изображающей форму ленты ВГ в бесконтактном режиме, разница между длиной хорды и длиной контактной поверхности мала по сравнению с длиной дуги, отсеченной хордой.

Другая теорема подтверждает рациональность перемещения барабанов для уменьшения стрелки прогиба батокса. При заданном возвышении барабанов над грунтом с изменением стрелки в бесконтактном режиме изменяется и длина контактной поверхности.

Теорема 2.

При увеличении межосного расстояния барабанов стрелка прогиба ленты ВГ в бесконтактном режиме уменьшается на величину, которая на порядок больше увеличения межосного расстояния.

Теорема определяет рациональность управления геометрией ВГ раздвижением барабанов. При подборе рациональной неуправляемой геометрии теорема показывает рациональность изменения стрелки прогиба при малых изменениях расстояния между барабанами, что облегчает поиск решения.

Теорема 3.

Если невесомая нерастяжимая лента гусеницы под действием постоянного нормального давления принимает форму дуги окружности со стрелкой прогиба F, то при любых значениях постоянных касательных нагрузок P_t и нормальных давлений P_n ни одна из точек гусеничного обвода не получит удаления от хорды больше, чем стрелка F.

Для упрощения задач теории и проектирования ТСВГ постель из пневмоплиц между лентой ВГ и грунтом заменяется континуумом, который наделен свойством удерживать гусеничную ленту над грунтом на высоте, равной высоте деформированной плицы. Убедиться в приемлемости такого допущения поможет рис. 2, б, где показаны плицы, деформированные между грунтом и лентой, загруженной равномерным избыточным давлением.

Клиренсом названо возвышение $K_{пол}$ полоза над грунтом.

Уравнение клиренса:

$$K_{пол} = H_Г + H_{НП} - H_{СК},$$

где $H_Г$ – подъем осей барабанов над уровнем нижней ветви гусеницы; $H_{НП}$ – высота пневмоплицы, деформированной гусеницей; $H_{СК}$ – высота скега от уровня осей барабанов. Геометрия гусеничной ленты должна соответствовать условию равновесия вертикальных сил.

Если шаг установки плиц вдоль гусеничной ленты $H_п$ равен диаметру плицы $D_П$, то высота деформированной пневмоплицы определяется по условию

$$H_Н = D_П\left[1-\frac{\angle_{\cup}}{\angle_{\wp\angle}}(2-\pi/2)\right].$$

Здесь $P_{ГР}$ – избыточное давление в пневмоплице на твердом грунте.

При проектной нагрузке задан вес транспортного средства G и заданы $K_{пол}$, $H_г$. При этом давление в пневмоплице соответствует допустимому давлению на грунт $[P_{гр}]$. Алгоритм счета проектной геометрии ВГ завершается расчетом необходимого диаметра пневмоплиц

$$\Delta_{\Pi}\ \frac{\subseteq_{\subseteq\angle}[\angle_{\wp\angle}]}{[\angle_{\wp\angle}]-\angle_{\cup}(2-\pi/2)}.$$

Для промыслового мореходного вездехода ТСВГ-20 для проектного состояния нагрузки расчетом получены избыточное давление $P_И$ = 14 000 Па, $D_П$ = 1,0 м, $H_{НР}$ = 0,7 м.

Многообразие условий эксплуатации определяет множество сил и моментов, способных создавать продольные наклонения ТСВГ. На рис. 3 дана схема возникновения продольного восстанавливающего

момента $M_ш$ при наклонении на угол ψ под действием дифферентующего момента $M_{диф}$. Момент восстанавливающий $M_ш$ определяется как момент пары сил: сила веса G приложена в центре тяжести ЦТ, сила поддержания – в центре контактного пятна С. Расстояние между линиями действия этих сил $l_ш$ – плечо продольной статической остойчивости, при $z_{go} = 0$ $l_ш = А$. Выявлена и представлена в форме теоремы особенность продольной остойчивости.

Если выполнены все условия первой теоремы, то на плоском горизонтальном грунте положение продольного метацентра определяется центром кривизны нижней ветви гусеничной ленты при свободном ее провисании под действием избыточного давления в бесконтактном режиме.

В техническом задании на ТСВГ, в отличие от требований к платформе на ВП, предлагалось обеспечить возможность надежного перемещения по тундре при любом возможном варианте размещения от 1 до 3 двадцатифутовых контейнеров массой по 20 т. При разгрузке судов с использованием платформы на ВП МПВП-40 снятие одного из контейнеров не позволяет буксировать ее к месту выгрузки другого контейнера из-за нарушения центровки. Расчетом показано, что для ТСВГ-40 сформулированное требование соблюдалось с большим запасом.

Движение на воздухоопорных гусеницах как новый принцип движения может получить право на распространение только при обеспечении поперечой остойчивости с гарантией неопрокидывания в эксплуатационно необходимых и экономически целесообразных условиях. Поперечная остойчивость как фундаментальное эксплуатационное качество ТСВГ изучается применительно к различным стадиям проектирования, конструктивно-компоновочным решениям, эксплуатационным ситуациям.

В приближенных решениях показана кубическая зависимость восстанавливающего момента от ширины ленты $В_Л$. При проектировании ТСВГ можно малыми изменениями $В_Л$ получать значительные изменения остойчивости. Оболочки с большой избыточной длиной обеспечивают малую остойчивость. Если ВГ образована раздуванием почти втугую натянутой на барабаны ленты, то значительной остойчивости можно ожидать даже при умеренной ширине ленты.

В целом опорные качества и остойчивость ТСВГ на грунте обеспечены компромиссно. Задачи вертикальной жесткости ВГ и расчета раздельно продольной и поперечной остойчивости решены, сведены с помощью линейных по углу наклонения выражений к привычным метацентрическим оценкам. Приемлемость такого подхода к проектированию подтверждена в ходе испытаний крупномасштабной мореходной модели. Множество использованных допущений оправдано сложностью и новизной задачи.

На ранних стадиях проектирования выполняется приближенная оценка посадки и остойчивости, в частности, осадки в полном грузу и порожнем при наличии ВП в ВГ и без поддува ВГ на воде.

Тяга ВГ для движения ТСВГ должна преодолевать сопротивление грунта, весовую составляющую сопротивления при преодолении уклона. Имеет место сопротивление воздуха. Внутренние потери ВГ определяются сопротивлением в осях барабанов, сопротивлением от трения в узлах уплотнения ВП. Возникает сопротивление от перематывания бортовых уплотнений ВГ в пазах барабанов. Транспортерная лента, используемая в качестве ленты гусеничной, создает сопротивление перематыванию через барабаны. Тяговые расчеты ТСВГ выполняются с учетом этих особенностей и с учетом опыта расчетов вездеходов и ленточных конвейеров.

Анализ тяговых способностей узла барабан-лента определяет четыре способа привода: привод только носовым барабаном; привод только кормовым барабаном; оптимальное для заданного коэффициента трения распределение тяги между кормовым и носовым барабанами; привод кормовым барабаном при ступенчатом регулировании тяги носового барабана. Большой резерв увеличения тяги обнаружен при повышении давления в полости ВГ. Повышение избыточного давления снижает величину минимально необходимого коэффициента трения. Расчеты тяговой способности выполняются для мокрой ленты. Во всех режимах работы тяга может быть обеспечена приводом только кормовых барабанов.

Возможность повышения давления увеличением оборотов нагнетателя предложено включать в проект для повышения проходимости увеличением клиренса, поперечной остойчивости и снижением необходимого коэффициента трения ленты на барабане.

Нарастание сопротивления воды движению судна при увеличении скорости обтекания корпуса определяет эффективность снижения сопротивления уменьшением скорости обтекания смоченной поверхности корпуса при сохранении скорости хода. Эта, казалось бы, парадоксальная ситуация давно привлекает исследователей. Один из методов реализации этой идеи называют движение обшивки судна по направлению вектора скорости набегающего потока. Такое движение рационально обеспечить образованием смоченной поверхности в виде широких гусеничных лент.

Классический подход к определению мощности, потребляемой движителем, при уравнивании сопротивления судна с упором его движителя для ТСВГ весьма сложен, поскольку на поверхности ВГ возникают одновременно гидродинамические силы и сопротивления, и

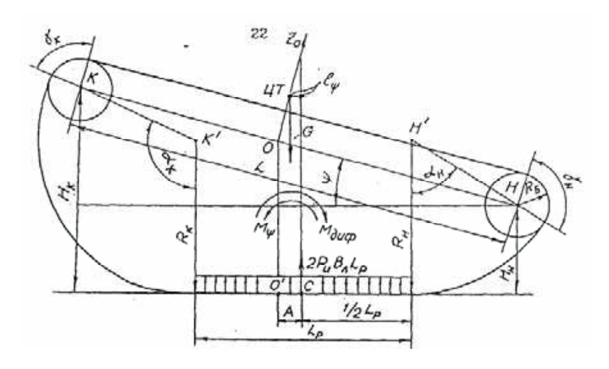


Рис. 3. Схема возникновения продольного восстанавливающего момента

тяги. При порожних пробегах возможны случаи, когда жесткие конструкции корпуса полностью будут над водой, в воде только движители, плавучесть которых обеспечивает поддержание ТСВГ. Для таких транспортных средств рационально устанавливать прямую связь между скоростью хода и подводимой к гусеницам мощностью.

На ранних стадиях проектирования оценку мощности приближенно получили на основе безразмерных гидродинамических характеристик, полученных при испытаниях моделей. Расчетом определено, что мощность двух гусениц ТСВГ-20 составляет 126,4 кВт при скорости хода 8 узлов. При этом отношение скорости хода к скорости перематывания гусениц составляет 0,55. Скорость проскальзывания ВГ относительно воды 3,37 м/с обеспечивает упор 16,9 кН.

Опыт проектирования и освоения новых типов амфибийных транспортных средств на воздушной подушке определил эффективность первоочередного исследования вертикальной качки для оценки соизмеримости периодов собственных колебаний с периодом характерного для региона волнения.

ВГ рассматривается как надувной корпус судна с обшивкой, движущейся по направлению вектора скорости набегающего потока. Эта схема отличается от традиционных тем, что надувной корпус подвергается большим формоизменениям на взволнованной поверхности и неровностях грунта.

Исследуются совместные перемещения вертикальные и килевые. При этом и на воде и на грунте предполагается, что неровность (волна) цилиндрична и образующая поверхности препятствия перпендикулярна курсу. Препятствие попадает под обе гусеницы симметрично диаметральной плоскости.

Обнаруженное расчетом мощное демпфирование вертикальной качки подтверждено экспериментом, что обосновывает прогноз столь же мощного гашения качки бортовой. Ускорения при наезде на выступ или ров в несколько раз меньше, чем это известно для тяжелых гусеничных машин. Выводы о высокой плавности хода подтверждены испытаниями крупномасштабной модели, что дает основание рекомендовать скорости хода на малых торосах и валунах до 30…40 км/ч.

В комплексе технических показателей ТСВГ особенно высокую оценку получает их экологичность. Предложен алгоритм выбора параметров схемы на начальных стадиях проектирования, в основе которого лежит сложившийся приоритет щадящего воздействия на грунт [3].

Интенсивная добыча нефти и газа в северных регионах России началась без надлежащего обеспечения транспортных и транспортно-технических работ вездеходами, эксплуатация которых гарантировала бы сохранность дернины грунта в летнее время. В результате использования общепромышленных образцов гусеничных и колесных тракторов и вездеходов, модернизированных образцов военной техники следами вездеходов повреждено более 15 % тундры России. Широко известны трудности восстановления дернины в условиях тундры, интенсивность протаивания и размывания колеи.

Не оправдались надежды на улучшение экологической обстановки за счет широкого применения транспортных средств на воздушной подушке. На пересеченной местности традиционный движитель – воздушный винт не обеспечивает преодоление уклона, а на боковом уклоне транспорт на воздушной подушке теряет управляемость. Множество комбинированных вездеходов предлагалось при освоении северных месторождений. Комбинация состоит в сочетании воздушной подушки как опорного устройства и колесных и гусеничных движителей как тягового устройства. На уклонах пересеченной местности движители имеют слабое прижатие к грунту и срывают дернину.

Вездеходы с широкими гусеницами при катковом опирании рвут грунт на боковых кромках гусеницы под действием концентрации нагрузок под катком. При хорошей проходимости и малом среднем давлении на грунт такие вездеходы не обеспечивают сохранность тундры.

Снижение несущей способности грунта тундры летом ставит разработчиков транспорта перед необходимостью уменьшения давления на грунт. При этом необходимо обеспечить возможно меньшие касательные напряжения в зоне контакта движителя с грунтом для сохранения от сдвига верхнего плодородного слоя почвы. Институт комплексных транспортных проблем (ИКТП) при Госплане СССР в 1990 году опубликовал требования к типажам наземных амфибийных внедорожных транспортных средств, где на перспективу были определены допустимые нагрузки на грунт 18…30 кПа. При этом несущая способность переувлажненной тундры оценивалась в 10…15 кПа [4].

Разрабатываемые в Морском государственном университете им. адм. Г.И. Невельского вездеходы на воздухоопорных гусеницах при больших площадях опорной поверхности гусениц прижимают гусеницы воздушной подушкой. Такое идеально равномерное распределение давления по площади опирания не создает концентрации нагрузок свойственной катковому опиранию на гусеницу. Воздухоопорная гусеница передает нагрузки на грунт через множество пневмобаллонов с малым давлением воздуха, на периферии контактного пятна которых обеспечивается плавное снижение нагрузки без среза характерного для боковых кромок жестких гусениц.

В предварительных разработках мореходных универсальных вездеходов на воздухоопорных гусеницах их целесообразная грузоподъемность определена от 5 до 60 т. Проблема обеспечения экологичности опорнодвижительного устройства должна быть разрешена и для малых и для больших грузоподъемностей.

В проектной практике воздействие на грунт гусеничного опорнодвижительного устройства оценивается по среднему давлению. Для гусеницы воздухоопорной такая оценка может быть достоверно использована как мера экологичности гусеницы, поскольку реальное давление на грунт сходно со средним. Например, полный вес вездехода спроектированного для сейсморазведки составляет $G = 150$ кН. При ширине гусеницы 1,05 м и

длине контактного пятна 7,48 м площадь опирания

$$S = 2 \cdot 1{,}05 \cdot 7{,}48 = 15{,}7\ м^2.$$

Давление на грунт среднее

$$P_{гср} = G/S = 150/15{,}7 = 9{,}55\ кПа,$$

что несколько ниже нижнего предела несущей способности даже переувлажненной тундры.

Предпроектными исследованиями вездеходов грузоподъемностью 5 и 10 т при параметрах воздухоопорных гусениц полностью удовлетворяющих требованиям хода по воде, болоту, пескам, мелким валунам и торосам, возможностям работы в прибойной полосе, преодолевать рвы и уступы, выходить из воды на прочный лед, при обеспечении хода по тонкому льду и весеннему разрушающемуся льду, на ходу на подъем и работе на боковом уклоне пересеченной местности среднее давление на грунт не превышает 12 кПа. Это позволит при полной загрузке вездеходов работать на многих видах переувлажненной тундры без повреждения дернины.

При проявлении признаков повреждений грунта экологичность вездеходов обеспечивается в летнее время снижением грузоподъемности и соответствующим снижением избыточного давления в воздушной подушке воздухоопорной гусеницы.

Методика повышения экологичности вездеходов снижением грузоподъемности учитывалась при проектировании мореходного вездехода грузоподъемностью 20 т. Разработка проекта экспериментального образца выполнялась по нашим схемам в Московском авиационном институте. При полной нагрузке давление в гусеницах необходимо поддерживать на уровне 15 кПа. При необходимости обеспечить работоспособность на слабых грунтах снижается грузоподъемность.

Для разгрузки судов в Арктике с выходом в тундру и для работы по освоению северных месторождений выполнены оценки параметров вездеходов грузоподъемностью 60 т при давлении в гусенице 24 кПа. В предпроектной информации оговорено, что такая грузоподъемность допустима зимой, когда не возникает угрозы разрушения грунта. На летнее время, как и для известного вездехода «Ямал», грузоподъемность снижается до 40 т. Снижение избыточного давления до уровня 18…20 кПа позволяет вписываться в нормы безвредного воздействия на грунт тундры летом при приемлемой грузоподъемности для обеспечения интенсивных разгрузочных, транспортных и транспортно-технологических работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азовцев А.И. Анализ возможностей применения гусеничных движителей на морских и речных судах // Труды ин-та / ДВВИМУ. Вып. 7. – Владивосток: ДВ книжн. изд-во, 1970. – С. 3–9.
2. Азовцев А.И., Самсонов С.В. Гидродинамические характеристики воздухоопорных гусениц // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1986. – № 2. – С. 172–174.
3. Азовцев А.И., Гаманов В.Ф., Луцай С.В. Возможности обеспечения щадящего воздействия на грунт тундры при использовании универсальных вездеходов на воздухоопорных гусеницах // Сб. матер. I Евро-Тихоокеанского конгресса, Владивосток, 2003.
4. Чеботаев А.А., Мельник А.Д. Безвредные транспортные средства для Севера // Научно-технический прогресс и перспективы развития новых специализированных видов транспорта: Матер. Всес. научно-практ. конф. – 23-26 окт. 1990. – Ч. 2. – М.: ВНИИПК техоргнефтегазстроя, 1990. – С. 115–125.